

補助事業番号 2018M-138  
補助事業名 平成30年度 炭素繊維強化プラスチック製の軽量・高強度な歩行支援装具の開発 補助事業  
補助事業者名 東京大学 武田伊織

## 1 研究の概要

本研究では、炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP）を用いて、軽量かつ高強度の装具を開発した。パラリンピックでも用いられているCFRPのバネ性に着目し、電動装具に比肩しうる歩行支援効果を持つ装具を提案する。蹴り出しを支援することで股関節屈曲角度が大きくなり、結果として歩幅の向上につながることがわかった。

## 2 研究の目的と背景

本研究の目的は、CFRPを活用した軽量かつ高強度な歩行支援装具の開発である。

金属フレーム装具は運動障害者の歩行支援に有用だが、重い（約2kg）ため、使用を断念する患者も多い。申請者は、金属に比べ軽量であるCFRPに着目し、図1のようなパラリンピック選手用の義足を参考にした装具を考案した。足関節の背屈時、装着者の体重によって、L字型のCFRPが変形する（図2b）。重心移動による除荷に伴い、復元力がはたらく（図2c）。これが床を蹴る力となり、歩行支援効果を生み出す。この装具の開発のため、まず①脚が受ける反力と支援効果の大きさを考慮し、装具全体の設計を行う。次いで、②脚と接する箇所を中心に装具のトポロジ最適化を行い、軽量化を図る。最後に、③実際に作製した装具を用いて歩行試験を行い、その支援効果を明らかにする。



図1 CFRP装具の構成

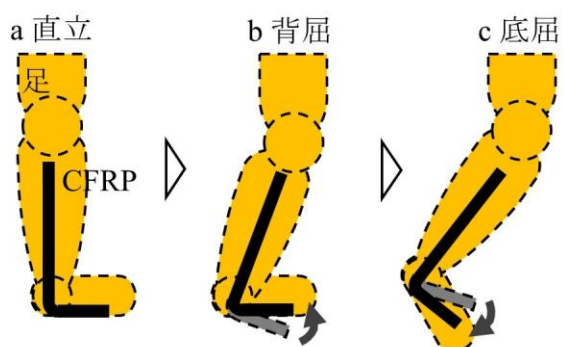


図2 歩行支援の原理

## 3 研究内容

(1) 炭素繊維強化プラスチック製の軽量・高強度な歩行支援装具の開発

(<http://www.psc.t.u-tokyo.ac.jp/takeda-iori/>)

### ①装具全体の設計（CFRPの位置）

CFRPバネの足に対する位置と、蹴り出しの支援タイミングとの関係を調査した。今回の調査範囲は、歩行の妨げにならない範囲として、図3のように定めた。図4は、CFRPの位置が歩行中の床反力に及ぼす影響を示している。上のグラフは、左脚と外側CFRPとの床反力の和である。下のグラフは、内側CFRPの床反力である。歩行時の足の床反力には、Maximum weight acceptanceとpush-offの2つのピークが見られる。内側CFRPの床反力は、位置が前方になるほど増加し、0%の場合最も高い。また、CFRPの床反力のピーク、すなわち最も大きな支援効果が発生するタイミングは、蹴り出し後に生じている。これは、反対側の足の接触から、約0.09~0.12秒後である。これは、Malcolmらが報告した代謝率の低下に必要な条件を満たしている（Malcolm, J. Neuroeng. Rehabil., 2015）。

支援のタイミングについては、CFRPの前後位置を変化させることで、制御可能であることがわかった。また、位置によって支援効果の大きさを制御することも可能であった。以上より、本研究の調査範囲内ならば、ユーザの状態に応じて支援効果の大きさを自由に調整することができる。

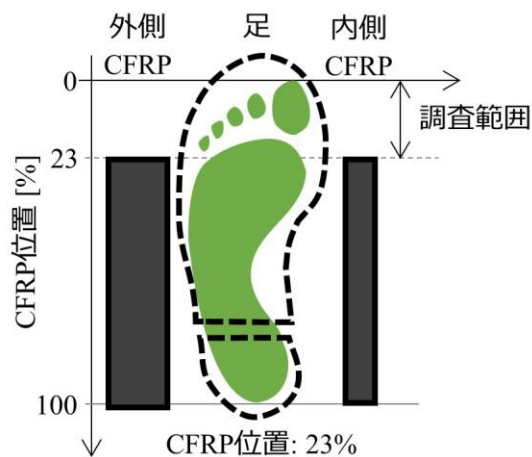


図3 CFRP位置の調査範囲

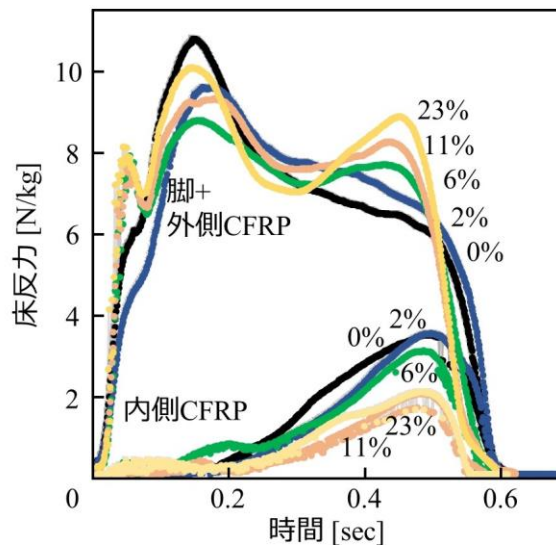


図4 CFRPの位置と床反力・支援タイミングとの関係

### ②装具のトポロジ最適化

Inspire（トポロジ最適化ソフト）を用いて、装具の設計指針を得た。目的関数として、剛性の最大化（弾性コンプライアンス最小化）、制約関数として、体積5～30%以下という条件で解析する。脛骨全面に硬い材料が当たると痛いため、装具前面は布のような柔らかい素材を用いる。そこで、装具前面以外を設計領域とし、水平方向の力20Nを加える。その際、CFRPの接地部と先端を固定する。計算結果の代表例を図6に示す。計算結果より、装具の後ろ側、すなわち大腿が接する部位は、CFRPからの反力を受ける際の強度にほとんど寄与

しないことがわかった。つまり、強度の観点から装具の構造は自由度が高く、CFRPとの接続部さえ補強していれば、デザイン性や着け心地を優先することができる。最終的な装具の構成は図Xのようになった。強度の問題は無いが、足との接触面積を広くとり、CFRPからの反力を分散させることとした。また、後方のCFRPが靴と装具とを繋いでおり、ズレ防止機能を果たしている。

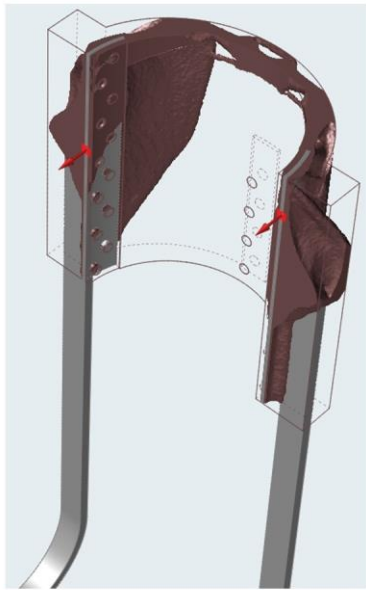


図5 装具のトポロジ最適化



図6 CFRP装具

### ③支援効果の検証

作製したCFRP装具を実際に着用し、その支援効果を確認した。被験者は両足にCFRP装具を着用し、モーションキャプチャシステム下に設置したトレッドミル上で歩行した。CFRPは、外側6 mm、後方2 mm、そして内側5, 5.5, 6 mmのものを用いた。1.25 m/sの速度で7分間歩行したうち、最後の2分間を評価対象とした。解析対象は主として関節角度である。今回は、歩行支援効果を調査する目的のため、各サイクルにおける関節角度の最大・最小値を抽出した（1サイクル=1歩）。

表1は、CFRPの厚さが、下肢の各関節角度及び歩幅に及ぼす影響をまとめたものである。歩幅は、歩行速度と歩行サイクルから算出した。今回調査したすべてのパラメータにおける、装具着用の有無、あるいはCFRPの厚さによる差異には1%の有意性が認められた。足関節を固定しているため、その可動域はおおむね減少しているが、歩幅や股関節屈曲角度が上昇していた。歩幅は装具着用で増加し、CFRPが厚くなるにつれ増加している。これは、次のように考えられる。CFRPバネは、パラリンピックの競技用義足を見ても明らかのように、歩行・走行速度を上昇させる効果がある。一方で、今回の実験は先行研究を参考とし、トレッドミル上での等速歩行という条件で行っている。すなわち、本来は歩行速度が上昇するところ、トレッドミルは等速でしか動いていないため、歩幅の増大という結果に現れた。

Bokmanらの研究では、腰装着型の電動装具着用により、歩行速度が4.7 km/hから5 km/hと、約7%向上していた（Bokman, IEEE Rob Autom Lett. 3, 3, 2018）。我々の装具では、単純に比較はできないものの、歩行速度に換算すると、 $t = 5 \text{ mm}$ で約7%、 $t = 6 \text{ mm}$ で約13%の向上となる。したがって、歩行速度の向上という観点では、彼らの電動装具よりも大きな支援効果があると言える。

次いで、股関節屈曲では、左足 $t = 5.5 \text{ mm}$ 以外の条件で、装具着用により増加が確認できる。この股関節屈曲角度（つまり、足を前に振る動作の大きさ）の増加は、歩幅の増加の一因であると考えられる。一方で、股関節伸展角度は、装具着用時に減少している。これらは、次のように考えられる。まず、股関節屈曲角度が増加したのは、CFRPバネの復元力によって脚が前方へ押し出された結果である。逆に、CFRPの変形を押し止められないため、股関節伸展角度は減少した。

以上より、少なくとも厚さ5～6 mmのCFRPを用いることで、歩行支援効果を有する装具が実現可能であることがわかった。特に、蹴り出しを支援する効果により、歩行中の歩幅ないし歩行速度が電動装具よりも向上するということがわかった。

表1 CFRPの厚さが各関節角度等に及ぼす影響

	歩幅 [m]	足関節	足関節	膝関節		股関節		股関節	
		背屈	底屈	屈曲		屈曲		伸展	
		左	左	左	右	左	右	左	右
装具なし	1.27	14.8	-18.0	76.9	69.2	33.6	27.1	-14.6	-15.4
t 5 mm	1.36	6.59	-15.7	71.6	67.4	36.3	36.5	-11.0	-6.36
t 5.5 mm	1.39	10.5	-8.72	70.0	66.6	30.8	32.0	-13.4	-12.5
t 6 mm	1.43	9.02	-25.6	72.8	72.0	38.4	39.3	-9.15	-8.19

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

高齢化社会にともない、歩行支援システムの需要はますます増加することが見込まれる。その際、重くて気軽に履けない装具は使われなくなってしまふ。本装具は軽量かつ高強度なCFRPを活用しており、充電を必要とすること無く電動装具以上の歩行支援効果が期待できる。すなわち、現行の歩行支援装具や支援機構を持たない装具に置き換わり、QoLの向上が見込める。

また、パラリンピックの陸上競技からもわかるように、そもそもCFRPは走行に向けた素材でもある。つまり、本装具を走行用にも転用可能であり、受益者は高齢者にとどまらなると考えている。

本研究成果により、CFRPによるバネが歩行支援機能を有することが明らかとなった。今回は、直進時の寄与の観点から、内側のCFRPのみに着目して調査を行ったが、日常生活で

は側方への旋回や椅子からの立ち上がりなど、他のCFRPが有効に働く場面も多い。個々のCFRPがどんな動作の時にどの程度の寄与があるのか、そして、どのような形状（主に厚さ）が効果的なのかなど、これから明らかにしていく予定である。これらが明らかにすることで、例えば起立支援効果の高い装具や中腰支援装具など、さらなる発展を見込んでいる。

CFRTP（熱可塑性の炭素繊維強化プラスチック）によって、装具の軽量化にも期待できる。最新のCFRTPは、強度の課題をクリアし、CFRPと同等の強度を持ちながら成形性が高いため、車等への活用が増加している。今年度中は採用しなかったが、3Dプリント成形物をCFRTPに置き換えれば、強度の向上と軽量化が同時に行える。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者の研究歴において、複合材料を活用した運動支援システムに関する、助成を受けた本格的な研究はこれがはじめてである。その中で、補助事業期間内に、想定以上の成果が得られている。今回の研究範囲では、CFRP装具の左右旋回やしゃがみ立ち支援などの効果を調査できなかったが、それらを調査し統合していくことで、真に実用に足る装具が完成すると期待している。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

論文1本を投稿中

#### 7 補助事業に係る成果物

該当なし（投稿論文を除く）

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東京大学 工学部 光量子科学研究センター

（トウキョウダイガク コウガクブ コウリョウシカガクケンキュウセンター）

住 所： 〒113-8656

文京区本郷 7-3-1 国立大学法人 東京大学

工学系研究科 光量子科学研究センター 小野寺研究室

担 当 者： 特任研究員 武田伊織（タケダイオリ）

担 当 部 署： 光量子科学研究センター（コウリョウシカガクケンキュウセンター）

E - m a i l： [i\\_takeda@psc.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:i_takeda@psc.t.u-tokyo.ac.jp)

U R L： <http://www.psc.t.u-tokyo.ac.jp/index.php>